

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Tepelný výměník pro spalovnu RAO

Heat Exchanger for RAO Incineration Plant

Student: Robert Olejník
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Robert Olejník**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**
Téma: **Tepelný výměník pro spalovnu RAO**
Heat Exchanger for RAO Incineration Plant

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište technologie pro spalování pevného a kapalného nízko-radioaktivního odpadu. Navrhněte projekční řešení trubkového výměníku spaliny-vzduch, vypočítejte kombinovaný přestup tepla ze spalín do vzduchu a určete základní rozměry výměníku včetně aerodynamického výpočtu ztrát. Výkon spalovny 180 kg/hod. Grafická část bude obsahovat schéma spalovny radioaktivních odpadů a konstrukční návrh výměníku spaliny-vzduch.

Seznam doporučené odborné literatury:


HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
Rédr, M., Příhoda, M.: *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991
ISBN 80-03-00366-0
Sadik Kakac: *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 13.12.2014
Datum odevzdání: 18.05.2015





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Bruntále 4 5.

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Bruntále : 4. 5. 2015

Robert Olejník

Adresa trvalého pobytu autora práce:
Bruntál, Dělnická 1337/13, 792 01

plné jméno autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za odborné vedení, ochotu, cenné rady, připomínky a předání mnohých zkušeností při vedení mé bakalářské práce.

Anotace

OLEJNÍK, R. *Tepelný výměník pro spalovnu RAO*. Ostrava, 2015. 35 s. Bakalářská práce. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Úkolem diplomové práce je navrhnout projekční řešení trubkového výměníku spaliny – vzduch pro spalovnu radioaktivních odpadů. V textové části je rozebírán postup spalování nízko-aktivního pevného a kapalného radioaktivního odpadu. Ve výpočtové části je úkolem spočítat kombinované přestupy tepla ze spalin do vzduchu, včetně výpočtů aerodynamických tlakových ztrát. Grafická část obsahuje výkres navrženého výměníku a schéma spalovny radioaktivního odpadu.

Klíčová slova: Výměník tepla, radioaktivní odpad, spalovna, kombinované přestupy tepla, aerodynamické tlakové ztráty.

Annotation of the Thesis

OLEJNÍK, R. *Heat Exchanger for RAO Incineration Plant*. Ostrava, 2015. 35 s. Bachelor Thesis. VŠB – TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Department of Power Engineering. Thesis head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The task of this thesis is to propose design solutions pipe heat exchanger flue gas - air incinerator for radioactive waste. In the text part is analyzed combustion process of low-level solid and liquid radioactive waste. Part of the solution is calculate the combined task transfers heat from flue gases into the air, including the calculation of aerodynamic pressure loss. Graphical part includes a drawing of designed scheme of heat and incineration of radioactive waste.

Key words: Heat exchanger, radioactive waste, incinerator, combined heat transfers, aerodynamic pressure loss.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	10
1 Úvod.....	13
2 Radioaktivní odpad	14
2.1 Dělení RAO	14
2.1.1 Podle aktivity	14
2.1.2 Podle skupenství	15
2.1.3 Podle poločasu rozpadu	16
3 Zpracování RAO.....	17
3.1 Zpracování pevného RAO	17
3.1.1 Minimalizace vzniku pevného RAO.....	17
3.1.2 Předúprava pevného RAO	18
3.1.3 Třídění a balení pevného RAO	18
3.1.4 Demontáž a fragmentace pevného RAO	18
3.1.5 Lisování pevného RAO	19
3.2 Zpracování kapalného RAO	19
3.2.1 Zpracování kontaminovaných vod.....	19
3.2.2 Zahuštění koncentrátu.....	20
4 Spalování RAO	21
4.1 Odpady pro spalování	21
4.1.1 Vlastnosti spalitelných odpadů	22
4.2 Proces spalování	23
4.2.1 Základní mechanismy hoření.....	23
4.2.2 Oxidace – hoření.....	23
4.2.3 Dodatečné spalování	23
4.3 Spalovací pece	24
4.3.1 Plazmová pec	24
4.3.2 Rotační pec	25
4.3.3 Fluidní pec	25
4.4 Tepelné výměníky.....	25
4.4.1 Rozdělní tepelných výměníků	26
5 Kontrola navrženého výměníku.....	29
5.1 Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu	29
5.1.1 Výpočet výhřevnosti paliva	30
5.1.2 Výpočet množství spalin.....	30
5.2 Spalování přídavného plynného paliva.....	31

5.2.1 Výpočet množství spalin z plynu	32
5.3 Fyzikální parametry výměníku	33
5.3.1 Parametry spalin	34
5.3.2 Přestup tepla na straně spalin	36
5.3.3 Parametry vzduchu	40
5.3.4 Fyzikální charakteristika vzduchu	41
5.3.5 Přestup tepla na straně vzduchu	42
5.4 Prostup tepla	44
5.5 Aerodynamický výpočet ztrát	45
5.5.1 Ztráta tření pro I. a II. tah	45
6 Závěr	48
7 Seznam použité literatury	49
8 Seznam obrázků	50
Seznam příloh	50

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Celý název	Jednotka
L	Délka trubky (výška výměníku)	m
Nu	Nusseltovo kritérium	-
Pr	Prandtlovo číslo	-
Q	Teplený výkon	kW
Q _p	Výhřevnost přídavného plynu	MJ/kg
Q _c	Celková výhřevnost odpadu	MJ/kg
RAO	Radioaktivní odpad	
Re	Reynoldsovo číslo	-
R ₁	Vnitřní poloměr	m
R ₂	Vnější poloměr	m
S _p	Rozteč řad	m
S _k	Rozteč trubek v řadě	m
T _{vz}	Termodynamická teplota vzduchu	K
V _{vz,s min}	Teoretické množství suchého spal. vzduchu	m ³ _N /kg
V ^v _{vz,s}	Skutečné množství vlhkého spal. Vzduchu	m ³ _N /kg
V ^s _{sp,t}	Teoretické množství vlhkých spalin	m ³ _N /kg
V _{H₂O}	Teoretické množství vody ve spalinách	m ³ _N /kg
V ^v _{sp,s}	Skutečné množství vlhkých spalin	m ³ _N /kg
V ^s _{vz,t,pl}	Teoretické množství vlhkého spalovacího vzduchu	m ³ _N /m ³ _N
V ^s _{vz,s,pl}	Skutečné množství suchého spal. vzduchu	m ³ _N /m ³ _N
V ^s _{sp,t,pl}	Teoretické množství suchých spalin plynu	m ³ _N /m ³ _N
V ^v _{sp,t,pl}	Teoretické množství vlhkých spalin plynu	m ³ _N /m ³ _N
V ^v _{sp,s,pl}	Skutečné množství vlhkých spalin plynu	m ³ _N /m ³ _N
V _p	Průtok přídavného plynu	m ³ /s
V _{sp,c,n}	Normální průtok spalin	m ³ _N /s

V_{sp}	Skutečný objemový průtok spalín	m_N^3/s
V_{vz}	Objemový průtok při normálním tlaku vzduchu	m_N^3/s
a	Součinitel teplotní vodivosti	m^2/s
c_{vz}	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$J/kg.K$
c_{med}	Měrná tepelná kapacita vzduchu pro teplotu média	$J/kg.K$
c_{st}	Měrná tepelná kapacita pro teplotu stěny	$J/kg.K$
c_{sp}	Měrné teplo spalín	-
d_1	Vnitřní průměr	m
d_2	Vnější průměr	m
d_{ekv}	Ekvivalentní průměr	m
k	Prostup tepla	W/mK
med	Médium	
m_0	Hmotnost dávky odpadu	kg
n	Přebytek vzduchu	-
n_p	Přebytek vzduchu pro plyn	-
p''	Parciální tlak	MPa
p_c	Atmosferický tlak	MPa
r	Měrná plynová konstanta	$J/kg.K$
sp	Spaliny	
st	Stěna	
t_{vz}	Teplota vzduchu	$^{\circ}C$
t_{sp}	Teplota spalín	$^{\circ}C$
t_m	Teplota média	$^{\circ}C$
t_s	Teplota stěny	$^{\circ}C$
vz	Vzduch	
w	Obsah vody ve spalínách	$\%$
w_{sp}	Rychlost spalín	m/s
w_{vz}	Rychlost vzduchu	m/s
x	Počet trubek	-
x_1	Počet trubek v řadě	-
α	Součinitel přestupu tepla	$W / m^2 .K$
α_{sp}	Součinitel přestupu tepla spalín	$W / m^2 .K$

α_{vz}	Součinitel přestupu tepla vzduchu	$W / m^2.K$
ε	Poměrná pohltivost	-
ξ	Místní ztráty	-
κ_v	Součinitel poměrného zvětšení objemu	-
λ	Tepelná vodivost	W/mK
λ_o	Tepelná vodivost oceli	W/mK
λ_{vz}	Tepelná vodivost vzduchu	W/mK
λ_{st}	Tepelný vodivost pro teplotu stěny	W/mK
λ_{med}	Tepelná vodivost pro teplotu média	W/mK
ν	Kinematická viskozita	m^2 / s
ν_{med}	Kinematická viskozita pro teplotu média	m^2 / s
ν_{st}	Kinematická viskozita pro teplotu stěny	m^2 / s
τ	Časový interval	s
φ	Relativní vlhkost vzduchu	%
μ	Dynamická viskozita	Pa.s
μ_{st}	Dynamická viskozita pro teplotu stěny	Pa.s
μ_m	Dynamická viskozita pro teplotu média	Pa.s

1 Úvod

Rostoucí rozvoj využití jaderné technologie v nejrůznějších oblastech lidské činnosti s sebou přináší celou řadu problémů, k jejichž řešení je nutno přistoupit již dnes. Jedním z příkladů může být v tomto ohledu i zajištění účinné likvidace radioaktivního odpadu, které bude schopno adekvátně reagovat na vzrůstající trend využití jaderné technologie ve společnosti a to jako po stránce kvantitativní, tak po stránce kvalitativní, kdy nové způsoby využití s sebou přináší nové druhy odpadů, jejichž likvidaci bude nutno technologicky zabezpečit.

V současné době vznik radioaktivního odpadu již není otázkou toliko provozu jaderných elektráren, nýbrž je možno jmenovat nejrůznější odvětví průmyslu či výzkumná centra jaderné energetiky. Stranou tohoto výčtu nelze ponechat ani nemocnice využívající ionizující záření. V rovině obecné je pak možno konstatovat očekávané další rozšíření tohoto spektra.

Jaderný odpad je možno klasifikovat dle různých kritérií, z nichž patrně nejvyšší míry relevance dosahují členění podle skupenství a typu vyzařovaného ionizujícího záření. Právě posledně jmenované kritérium je kvůli svým devastujícím účinkům na živou tkáň hlavním důvodem pro systematickou likvidaci tohoto odpadu.

Jednu z možných variant likvidace radioaktivních odpadů představuje jejich kontrolované spalování ve spalovnách odpadu, při němž dochází k redukci objemu a hmotnosti spalovaného předmětu, v důsledku čehož je možno docílit zvýšení životnosti skládek – hlubinných úložišť. Při tomto způsobu likvidace dochází k většinovému přechodu radioaktivity do konečného produktu, zbytková radioaktivita je pak zachycena ve filtračním systému.

Cílem této práce je popsání procesu spalování radioaktivních odpadů a v návaznosti na to vytvoření návrhu tepelného výměníku spaliny–vzduch pro spalovnu radioaktivních odpadů, který bude umístěn za spalovací pecí, a jehož účelem bude ochlazení spalin před jejich vstupem do filtračního systému. Následně bude v práci proveden výpočet kombinovaného přestupu tepla ze spalin do vzduchu a to včetně aerodynamických ztrát. U návrhu výměníku budu vycházet z navržených parametrů.

- Výkon spalovny 180 kg/hod
- Vstupní teplota spalin $t_{sp,1} = 1\,000\text{ °C}$
- Výstupní teplota spalin $t_{sp,2} = 220\text{ °C}$
- Vstupní teplota vzduchu $t_{vz,1} = 20\text{ °C}$
- Délka trubek výměníku $L = 4\text{ m}$

2 Radioaktivní odpad

Za radioaktivní odpady se dají považovat veškeré dále nevyužitelné materiály, které prokazují radioaktivní vlastnosti. Radioaktivní odpady vznikají při práci s radionuklidy nebo ionizujícím zářením a to v zemědělském, průmyslovém, lékařenském průmyslu. Nejčastěji jsou spojovány s jadernými elektrárnami, kde vznikají při výrobě elektrické energie a to v podobě vyhořelých palivových článků. Množství vzniklého radioaktivního odpadu je v porovnání s odpady z jiných odvětví relativně malé.



Obr. 2 – Mezinárodní značení radioaktivního odpadu

2.1 Dělení RAO

Při práci s radioaktivními odpady je důležité správně určit jejich vlastnosti. Existuje totiž velké množství druhů radioaktivních odpadů a každý vykazuje jiné vlastnosti, tím pádem je s nimi potřeba nakládat rozdílně. Z těchto důvodů se radioaktivní odpady dělí do několika skupin.

2.1.1 Podle aktivity

- a) Nízkoaktivní – Skupina nízkoaktivních odpadů tvoří 90% objemu celosvětového radioaktivního odpadu, avšak představuje pouze 1% veškeré radioaktivity. Jedná se především o odpady s krátkým poločasem rozpadu, tudíž brzy jejich aktivita klesá na přijatelnou mez. Tato skupina odpadů nepotřebuje speciální stínění ani zacházení. Největší producenti tohoto odpadu jsou lékařské a energetické průmysly. V jaderných elektrárnách jsou na tyto odpady kladeny přísné předpisy a to hlavně z důvodu velkého množství. [1,2,5,6]
- b) Středně aktivní – Skupina středně aktivních odpadů tvoří 7% objemu celosvětového radioaktivního odpadu a 4% veškeré radioaktivity. Tyto odpady

jsou již velmi nebezpečné svému okolí, a proto podléhají přísným bezpečnostním opatřením. Pro jejich uskladnění je potřeba speciálních prostorů, které jsou opatřeny potřebnou vrstvou stínícího materiálu, který izoluje ionizující záření. Každá aktivita s těmito odpady se zaznamenává do individuálních průvodních listů. Mezi tyto odpady řadíme kaly a pryskyřice z chemického průmyslu, různé aktivní části z jaderných elektráren nebo zářiče k léčbě rakoviny z lékařského průmyslu. [1,2,5,6]

- c) Vysoce aktivní – Skupina vysoce aktivních odpadů tvoří pouhých 3% objemu celosvětového radioaktivního odpadu, ale na druhou stranu 95% veškeré radioaktivity. Jedná se o nejnebezpečnější odpady s vysokou radioaktivitou, která při kontaktu s živou tkání okamžitě degraduje zasažené buňky, co ve většině případů vede k smrti. Do této skupiny odpadů řadíme vyhořelé jaderné palivo. Při manipulaci s tímto odpadem je zapotřebí chlazení v řádu několika let (z důvodu vytváření se tepla při rozpadu radionuklidů), stínění a jeho následné dlouhodobé uložení v hlubinných dolech z hlediska bezpečnosti. Jakákoliv práce s radioaktivním odpadem se eviduje a spadá pod přísný dozor firmy, tak státu či certifikované mezinárodní firmě. Samozřejmostí je vysoká bezpečnost práce pro zaměstnance v podobě ochranných pomůcek proti radioaktivitě tak i proti úniku radioaktivity do okolí. [1,2,5,6]

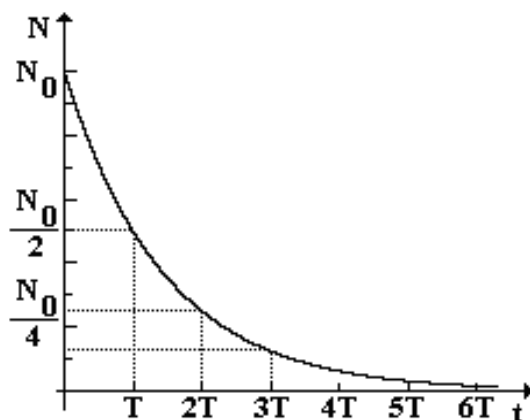
2.1.2 Podle skupenství

- a) Plynné – Při spalování radioaktivních odpadů, při provozu jaderné elektrárny nebo zpracovávání uranové rudy vznikají radioaktivní plyny (halogeny, různé vzácné plyny a tritium) a aerosoli (disperzní soustava malých pevných nebo kapalných částic v plynu). Tyto plyny jsou před vypuštěním do atmosféry zpracovány tak, aby obsahovali pouze stopové množství radioaktivních látek. Ve spalovnách radioaktivních odpadů dosáhneme těchto parametrů pomocí předfiltračních a filtračních jednotek, které jsou zabudovány do systému. Některé vzácné plyny stačí pouze odvést do izolované soustavy, kde se pár hodin či dní podrží a díky krátkému poločasu rozpadu již nebudou nebezpečné okolí a mohou se vypustit do atmosféry. Riziko kontaminace okolí je u tohoto druhu odpadů velmi vysoké, jelikož při uvolnění plynů do atmosféry dojde k jejich neřízenému pohybu do všech směrů, ovšem při celkovém objemu vypuštěných plynů k celkovému objemu vzduchu se jejich koncentrace bude blížit nule. [1,5,6]

- b) Kapalné – Největším producentem kapalného radioaktivního odpadu jsou jaderné elektrárny, kde se používá voda, jako chladicí médium reaktoru. Dále zde vznikají také vody používané pro čištění primárního paliva, bazénů nebo pro skladování vyhořelého paliva. Ovšem kapalné radioaktivní odpady vznikají také v nukleární medicíně v podobě různých kontrastních radionuklidů, nebo na lůžkovém oddělení v podobě splaškových vod. Tento druh odpadu je nejrizikovější, jelikož při jeho úniku dokáže voda zatéct do různých spár, a tím dokáže kontaminovat rozlehlý prostor. Většina kapalných odpadů končí v sudech, které jsou později uloženy hlubinných uložistištích, ovšem část těchto vod má zanedbatelnou aktivitu a může být vypuštěna zpět do životního prostředí. [1,5,6]
- c) Pevné – Pevné radioaktivní odpady tvoří největší část vznikajících radioaktivních odpadů. Vznikají při jakémkoliv styku s ionizujícím zářením a to jak v jaderných elektrárnách, v podobě různých předmětů z provozu, údržby a revizí jaderné elektrárny, tak i v medicíně nebo těžebním průmyslu. Manipulace s pevným radioaktivním odpadem je jednoduchá, oproti kapalnému nebo plynému radioaktivnímu odpadu, a to díky své celistvé struktuře. A proto je i nejnižší riziko kontaminace okolí při úniku do okolí. Nejčastěji se tento druh odpadů dělí na lisovatelné, nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné. [1,5,6]

2.1.3 Podle poločasu rozpadu

Poločas rozpadu - Veličina, která nám udává dobu t , za kterou se rozpadne polovina jader N_0 přítomných na začátku (obr. 2.1). Jedná se o proces samovolný a má statický charakter, jelikož rozpad jednoho jádra můžeme brát, jako náhodný jev. Proto dělíme radioaktivní odpady s dobou rozpadu hlavního radionuklidu na krátkodobé a dlouhodobé. [3,6]



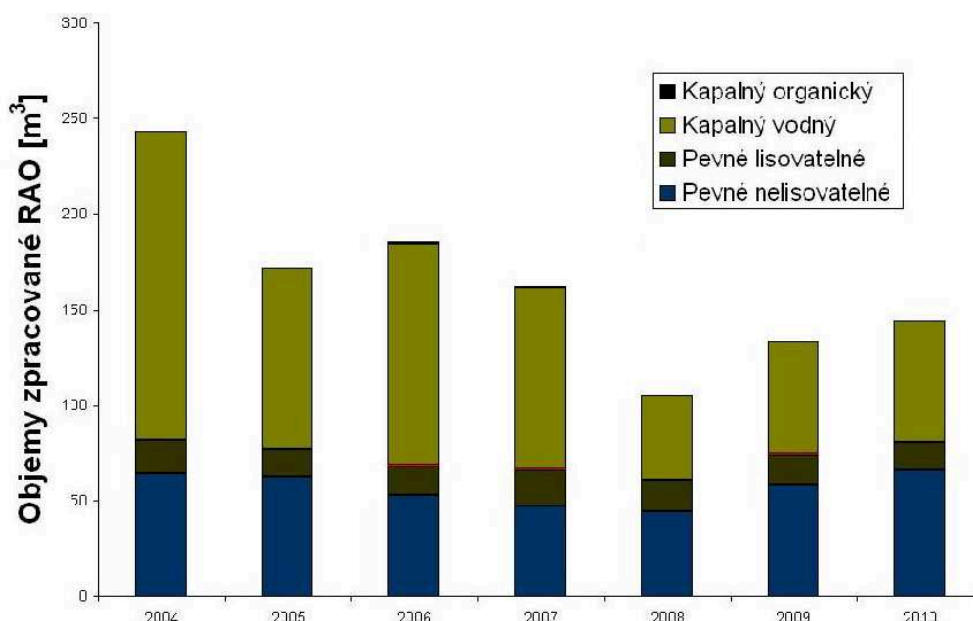
Obr. 2.1 - Graf znázorňující poločas rozpadu

a) Krátkodobé – Poločas rozpadu okolo 30let.

b) Dlouhodobé – Poločas rozpadu v řádu tisíců až milionů let.

3 Zpracování RAO

Zpracování radioaktivních odpadů je proces, při kterém se snažíme snížit celkový objem vzniklého radioaktivního odpadu a zároveň se snažíme o snížení koncentrace radionuklidů v něm obsažené, abychom mohli s takto zpracovaným odpadem dále nakládat. Z důvodu různorodosti radioaktivních odpadů máme i různé postupy, při zpracovávání. Na obr. 3 jsou znázorněny objemy zpracovaných RAO na území ČR.



Obr. 3 – Objemy zpracovaných RAO na území ČR v posledních letech

3.1 Zpracování pevného RAO

Při zpracovávání pevných radioaktivních odpadů je třeba používat kombinované procesy, které budou postupně upravovat vlastnosti a tvar odpadů tak, aby v konečném výsledku měl, co možná nejmenší objem a dalo se s ním snadněji manipulovat.

3.1.1 Minimalizace vzniku pevného RAO

Při minimalizaci množství vzniklého radioaktivního odpadu, vycházíme z předpokladu, že odpad, který není vytvořený, nevyžaduje žádné náklady na jeho další

zpracování. Tento proces je ekonomicky velice účinný a patří mezi neoddělitelnou součást procesu zpracování radioaktivního odpadu.

Prvním krokem minimalizace vzniku radioaktivního odpadu je samotný návrh zařízení, které bude pracovat s radioaktivními materiály, kde se musí dbát na to, aby použité technologie a stroje dosahovali požadavkům minimálního vzniku radioaktivního odpadu. Další kroky se realizují přímo ve výrobě, kde je potřeba se zaměřit na optimalizaci procesu, tak aby se využilo maximum materiálu při minimální tvorbě odpadu. [1,8,9]

3.1.2 Předúprava pevného RAO

Předúpravu radioaktivních odpadů můžeme brát, jako soubor činností (oddělování a třídění, redukce objemu, balení na přepravu do dočasného uložení nebo zpracovatelských zařízení, dekontaminace), které povedou k vhodné úpravě odpadů, pro další technologická zpracování. Předúprava radioaktivních odpadů začíná u samotné produkce odpadu, kdy nám administrativní předpisy přesně určují manipulaci s odpadem, tak abychom mohli odpad přepravit do dočasných skladovacích prostorů nebo přímo do zpracovatelských zařízení. [1,8,9]

3.1.3 Třídění a balení pevného RAO

Cílem třídění odpadu je jeho rozdělení do skupin podle stupně a druhu kontaminace a jejich fyzikálně-chemických vlastností. Kvalita roztrídění odpadu následně velmi ovlivňuje jejich další zpracování. Třídění se provádí ručně v třídících boxech nebo automaticky, kde je odpad tříděn podle úrovně beta-gama záření. Roztríděný odpad je následně evidován, zabalen a označen, a následně postupuje dále podle určené manipulace. [1,8,9]

3.1.4 Demontáž a fragmentace pevného RAO

Cílem demontáže a fragmentace je zredukovat velikost velkých částí na menší, se kterými se lépe manipuluje. Tento krok se skládá z operací, které se používají normálně při údržbě až po kompletní rozmontování přístrojů a zařízení. Při demontáži se postupuje stejnými postupy, jako u konvenčních strojařských metod (pilování, řezání, vrtání). [1,8,9]

3.1.5 Lisování pevného RAO

Tahle metoda mechanického zmenšování objemu odpadů se používá především pro nespalitelné odpady nízko a středně aktivní, ale používá se i pro nízkoaktivní alfacontaminovaný spalitelný odpad, který se nebude používat pro spalování. Účelem procesu lisování je zmenšit sypanou hmotnost odpadů při použití síly 3 – 1500 tun a lisovacího tlaku 3 – 11 MPa v závislosti na druhu odpadu. Pro lisování se používají hydraulické a pneumatické tlaky, které se dále dělí na vysokotlaké a nízkotlaké.

Nízkotlaké lisování je využíváno pro malé redukce velikosti odpadů a slouží především k ulehčení balení k přepravě. Nízkotlaké lisy pracují se silami do 10 t a lisují odpady do 200 l sudů, které jsou malé, a lehce se s nimi manipuluje.

Vysokotlaké lisování se používá ke konečné redukci velikosti odpadů, kde se snažíme o dosažení ideální velikosti finálního produktu. Vysokotlaké lisy pracují se silami do 1500 t, ale jsou v porovnání s nízkotlakými lisy ekonomicky náročnější a kladou mnohem větší nároky na prostor. Finální výlisek se uzavírá do úložných kontejnerů, které putují do dlouhodobých uložišť. [1,8,9]

3.2 Zpracování kapalného RAO

Hlavním cílem zpracovávání kapalných RAO je snížit obsah radionuklidů, tak abychom mohli významné složky odpadu znovu využít nebo odpad navrátit bezpečně zpátky do životního prostředí. K těmto účelům využíváme dva principy, kde první princip slouží ke zpracování kontaminovaných vod a druhý k zahuštění koncentráту.

3.2.1 Zpracování kontaminovaných vod

- a) Metoda odpařování - Jedná se o jednu z nejúčinnějších metod snížení objemu a dekontaminace odpadních vod. Při procesu se dosáhneme dekontaminačního faktoru až 10^4 (v kondenzátu po odpaření je tisícina původního množství radionuklidů). Dekontaminace procesu odpařování je tak vysoká, že zkondenzovaná voda po odpaření se může vypustit zpět do životního prostředí. Výsledným produktem je pevný zbytek v podobě solí, kde je uložen zbytek radionuklidů. [4,5,8]
- b) Metoda odstraňování pevných částic – Pomocí filtrů a odstředivek lze odstranit pevné zbytky, které jsou obsaženy v odpadních vodách. [4,5,8]

- c) Metoda biologicky čistící – Jedná se o další metodu k odstranění pevných zbytků za pomoci mikroorganismů, které na sebe dokáží vázat radionuklidy. [4,5,8]
- d) Chemické metody – Princip chemické metody spočívá v přidávání srážecích činidel do odpadních vod, což vede ke srážení radionuklidů, které se následně usadí na dně nádrže. Jako srážecí činidla se nejčastěji používají železití nebo hliníkaté soli. Další chemická metoda spočívá v přidávání vločko-tvorných chemikálií, které na sebe vážou radionuklidy ve formě vloček. Dekontaminační faktor je u této metody nízký, a proto se tato metoda kombinuje s dalšími metodami. [4,5,8]
- e) Fyzikálně – chemické metody – Nejčastěji využívaná kombinační metoda zpracování RAO (adsorpce, elektrodialýza, reverzní osmóza a iontová výměna). [4,5,8]

3.2.2 Zahuštění koncentráту

- a) Cementace – Nejpoužívanější metoda likvidace kapalného radioaktivního odpadu, kdy se snažíme vodu obsaženou v kapalných radioaktivních odpadech vázat na cement. Celý proces probíhá za studena a je finančně nenáročný. Výsledný produkt je nehořlavý a stabilní. Touto metodou se dají upravit velké množství radioaktivních odpadů, ovšem obrovskou nevýhodou je zvětšování jejich objemu až na dvojnásobek. Další nevýhodou je nízká hydrolytická odolnost, proto praktikujeme metodu cementace především na odpady s nízkou aktivitou. Nejčastější problém spojený s procesem cementace je tuhnutím a tvrdnutím celé směsi, který se řeší přidáváním různých aditiv do směsi, a tím se zlepšují její vlastnosti. [4,5,8]
- b) Polymerace – Jedná se o novější metodu, při které se radioaktivní odpad zabudovává do umělých hmot (polyester, vinylester nebo epoxidové pryskyřice). Výhodou polymerace je vytváření velice tvrdých materiálů, které mají velkou odolnost vůči vyluhování radionuklidů a chemickou netečnost. [4,5,8]
- c) Bitumenace – Princip metody spočívá v odpaření vody z kapalného radioaktivního odpadu a zbylý suchý zbytek se sloučí s bitumenem nebo bitumenovou emulzí. Bitumen je organická hmota svými vlastnostmi podobná asfaltu. Obrovskou výhodou procesu je dosažení velké objemové redukce, ale hrozí zde nebezpečí požáru způsobené hořlavými vlastnostmi asfaltu. Další

obrovskou nevýhodou tvoří investiční náklady do zařízení pro bitumenaci a jeho následnou obsluhu. Výsledný produkt se skladuje v ochranných sudech, které jsou uloženy na uložistiích. [4,5,8]

- d) Virtrifikace – Metoda, které se používá pro zpracování vysoko aktivních kapalných odpadů pomocí složité technologie. Princip metody spočívá v odpaření vody z radioaktivního odpadu, do kterého se přidají sklotvorné přísady, a při teplotě až 1200 °C se vytaví křemičitanové nebo boro-křemičitanové sklo pomocí sklářských metod. Takto vytvořené sklo se značí vysokou odolností vůči vyluhování vodou, vysokou mechanickou pevností a dobrou tepelnou vodivostí. Tepelná vodivost se často zlepšuje obalováním kapek skla v roztaveném olovu nebo hliníku. [4,7]

4 Spalování RAO

Spalování RAO je proces, při kterém se za pomoci termické energie výrazně snižuje objem a hmotnost RAO a vzniká konečný homogenní produkt. Spalování je vhodné pro spalitelné pevné RAO, kterých je až 80%, ale také pro kapalné RAO. Výhodou tohoto procesu je možnost spalování olejů, mazadel a jiných rozpouštědel, které se samostatně špatně likvidují. Po procesu spalování přejde až 97% radioaktivity do konečného produktu a zbytek se zachycuje ve filtrech pro čištění spalin. Proces spalování probíhá v spalovnách odpadů, konkrétněji ve spalovacích jednotkách. Cílem procesu je dosáhnout minimálního úletu spalin a dokonalého spalování odpadů, tak aby se s konečným produktem dalo, co možná nejlépe manipulovat. [1,8,9]

4.1 Odpady pro spalování

Odpady pro spalování se dají jednoduše roztřídit na spalitelné a nespalitelné. Nespalitelné odpady mají negativní vliv na spalovací proces, což vede ke zhoršení vlastností finálního produktu. Proto se nespalitelné odpady snažíme vytřídit již v separačních boxech, tak aby nadále nezasahovaly do procesu spalování. Mezi nespalitelné odpady řadíme kovové a skleněné kusy, výbušné materiály, odpady s vysokou radioaktivitou nebo s vysokým obsahem nehořlavých látek.

Spalitelné odpady mají různé fyzikální a chemické vlastnosti, výhřevnost a rozsah radioaktivity je taky odlišný. Nejvyšší účinnosti spalování spalitelných odpadů se dosahuje při správném roztřídění odpadů podle požadavků a kritérií, které byly vypracovány při návrhu spalovny. Pro spalovací účely se odpady můžou rozdělovat do skupin:

- Papír, dřevo, grafit a celulózové materiály
- Plasty a guma
- Živočišně kostry
- Oleje

Kapalné odpady se taky likvidují spalováním za předpokladu, že mají určitou výhřevnost. Spalují se společně s pevnými odpady. Před samotným vstřikováním kapalných odpadů do pece je potřeba upravit jejich viskozitu předehřevem nebo studeným ředěním s rozpouštědlem. Je potřeba odstranit pomocí filtrace z kapalných odpadů minerální částice. [1,8,9]

4.1.1 Vlastnosti spalitelných odpadů

Fyzikální – Ovlivňují spalovací výkon. Spalování příliš celistvých materiálů může mít za následek neúplné spálení materiálu, zatímco spalování práškových materiálů může vést k spontánnímu hoření. [1,8,9]

Chemické – Určité materiály produkují vysoko korozivní plyny (chlorovodík a fluorovodík), které mohou způsobovat škody na filtračních zařízeních a extrakci plynů. [1,8,9]

Výhřevnost – Stanovuje teplotu v peci. Každý odpad má určitou výhřevnost (tab. 4.1) a určitý obsah vlhkosti. Oba tyto faktory ovlivňují výkon spalování a frekvenci zatížení spalovacího prostoru. Ve spalovacím prostoru je nutné dodržovat správnou teplotu, aby se dosáhlo dokonalého spalování a zamezilo se výstupu nespálených částic z pece. [1,8,9]

	Qi [MJ·kg ⁻¹]
Dřevo	14,62
Papír	14,11
PVC	20,5
Pryž	34,92
Polyethylen	43
Polypropylen	44
Polyamid	30

Tab. 4.1 – Přehled výhřevností různých materiálů []

4.2 Proces spalování

Spalování se dá rozdělit do 3 procesů, ale k zajištění dokonalého spalování je potřeba zajistit tyto faktory:

- Dostatečně velký objem spalovací komory
- Dostatečnou dobu kontaktu spalovaného materiálu se vzduchem
- Teplota spalování
- Intenzivní míšení hořlavých plynů se vzduchem

4.2.1 Základní mechanismy hoření

Proces spalování, při kterém se dějí následující děje:

- Spalované látky se tepelně degradují – rozpad dlouhých molekul na krátké molekuly
- Vzniklé menší molekuly začnou pronikat na povrch tuhé fáze
- Z povrchu tuhé fáze se začnou odpařovat malé molekuly a přechází do plynné fáze [1,8,9]

4.2.2 Oxidace – hoření

Proces navazující na základní mechanismy hoření, kdy vytvořené plyny začínají reagovat s kyslíkem a vytváří termickou energii. Takto vzniklá termická energie dodává zpětně energii a vytváří se opět plyny, které budou následovně reagovat s kyslíkem. Čas průběhu procesu pyrolýzy a hoření se dá nejlépe ovlivnit velikostí spalované části, nikoliv zvyšováním teploty v peci, to má pouze malý vliv na kinetiku hoření. Proto je důležité posílat do pece nadrcený odpad. Urychlíme tím celý proces spalování i samotnou disperzi odpadu během spalování. [1,8,9]

4.2.3 Dodatečné spalování

Dodatečné spalování probíhá v dopalovacích komorách, kde se zajišťuje spálení zbylých nespálených uhlovodíků, oxidu uhličitého a sazí. Aby proběhlo dokonalé spálení těchto zbylých částí, je nutno zajistit dostatečný kontakt spalín se vzduchem a také dostatečnou dobu zadržení spalín v dopalovací komoře. Pro příklad pro dokonalé spálení sazí o velikosti menší než 1 mm, je potřeba tyto saze udržet 10 sekund v dopalovací komoře se 100 % přebytkem vzduchu a teplotě 1 000°C. Ovšem pokud ve spalínách nejsou přítomny saze, postačí nám zdržet spaliny 1 sekundu v primární

komoře o 1 000°C a dojde k dokonalému spálení plynných složek. Zamezení vzniku sazí se zajišťuje pomocí stechiometrického poměru palivo:vzduch ($>1,4$), ale také pomocí dostatečného promíchání spalovacích odpadů se vzduchem, ještě před samotným procesem spalování. Ovšem promíchání pevných odpadů se vzduchem je prakticky nemožné, takže se vzduch přivádí pod a nad rošt, čímž optimalizujeme míchání vzduchu s odpady, a dosáhneme tím snížení tvorby sazí.

Vhodné dávkování vzduchu nemá pozitivní vliv pouze na snížení tvorby sazí, ale také nám zajišťuje účinné spalování v peci a pomáhá nám udržet vhodné přechodné teploty. Při dávkování vzduchu do pece, se musíme vyhnout příliš silným proudům vzduchu, jelikož se zvyšuje riziko únosu drobných nespálených částic do systému čištění spalin.

Teplo potřebné k zapálení a provozu spalování se zabezpečuje pomocí plynových, naftových nebo elektrických hořáků. Hořáky nám také zajišťují správnou teplotu v peci při zahajování procesu spalování a v průběhu spalování nám vyrovnávají tepelné ztráty, tak aby stále docházelo k dokonalému spalování (vyrovnávají rozdíl mezi potřebnou energií a energií získanou z odpadů).

Ideální teplota pece pro spalování by se měla pohybovat od 700°C – 1 100°C. Většina pecí je nastavená tak, aby udržovali teplotu kolem 900°C, což je teplota při které se omezuje množství vzniklých sazí a neshořelého odpadů ve spalinách.

Pro snížení množství nespálených částic, které vystupují z primární pece, se instalují na její výstup přídatné hořáky, které zajistí dopálení těchto částic. Teplota hořáku se pohybuje kolem 1 100°C. [1,8,9]

4.3 Spalovací pece

Základem každé spalovny je vhodný výběr spalovací pece, která bude splňovat kritéria pro spalování určitého množství a druhu odpadu. Každá spalovací pec je řešená, jako dvoustupňová. V prvním stupni spalovací pece se zajišťuje maximální shoření spalovaného odpadu a v druhém stupni spalovací pece se zajišťuje dohoření plynné fáze odpadů z prvního stupně, což je dáno časem, který tam plynná fáze odpadu musí strávit, a teplotou v dohořivací komoře.

4.3.1 Plazmová pec

Plazmová odstředivková pec využívá teplo z plazmového obloukového hořáku jako výpomoc ve spalovacím procesu radioaktivitou kontaminovaného odpadu. Tato dodatečná energie umožňuje roztavení inertních součástí na pevné slinuté produkty. Jedná se o dvoukomorové spalovací zařízení, které funguje semi-kontinuálně. Odpadní materiál se vloží do primární otočné pece, kde díky sub-stechiometrické operaci dojde k

pyrolýze organických frakcí. Plazmový hořák v primární komoře roztaví inertní frakci odpadu a otáčky ve výši 50 ot/min vytlačí tekutou strusku na vnější stěny. Plynné produkty jsou zcela spáleny v sekundární spalovací komoře. Použití vzduchové plazmy a čistého kyslíku pro spalování má za následek velmi nízký objem odpadních plynů. Po naložení přibližně 500 kg inertního materiálu je rotace komory snížena, tekutá struska stéká do středu komory; poté struska teče středem primární komory, propadá do sekundární spalovací komory a sbírá se do formy pod sekundární komorou.[10,11]

4.3.2 Rotační pec

Rotační spalovací pec je válcovitého tvaru se žáruvzdornou vložkou s mírným náklonem. Otáčení a náklon pece umožňují pohyb odpadu pecí a také důkladné promíchání radioaktivního odpadu. Otočené pece běžně vyžadují sekundární spalovací komoru, aby bylo zajištěno důkladné zničení nebezpečných látek. Primární spalovací komora slouží k tepelnému rozkladu nebo přeměně pevného odpadu na plyny. Spálení plynů je pak dokončeno v sekundární komoře. Jak primární, tak i sekundární spalovací komora jsou vybaveny pomocnými palivovými systémy. Pro řízení vysokého obsahu emisí se obvykle vyžaduje kompletní systém na zpracování odpadních plynů. [10,11]

4.3.3 Fluidní pec

Spalovací pec s fluidním ložem se skládá ze svislé nádoby s ohnivzdornou vložkou obsahující lože z inertního materiálu. Lože je “fluidizováno” procházejícím vzduchem, který slouží jako spalovací vzduch, který proudí perforovanou deskou na dně nádoby. Radioaktivní odpad je přisouván ke spalování do horkého lože, kde vzduch o vysoké teplotě společně s vířením materiálu lože rychle přivádí teplotu k odpadu. K udržení vysoké teploty lože se často používá doplňkové palivo. Pro úplné spálení nebezpečných odpadů může být vyžadována sekundární spalovací komora. Do lože se obvykle přidává vápenec za účelem zvýšení schopnosti lože likvidovat kyselé plyny vznikající v loži (tím není nutné instalovat systém mokrého čištění plynů). Alternativní technologií spalování pomocí fluidního lože je cirkulační systém lože, kde je díky vysoké rychlosti vzduchu dosaženo vysoké přenosné rychlosti – tím je kontaminovaný materiál opětovně zachycen a vrácen do systému ke zničení. [10,11]

4.4 Tepelné výměníky

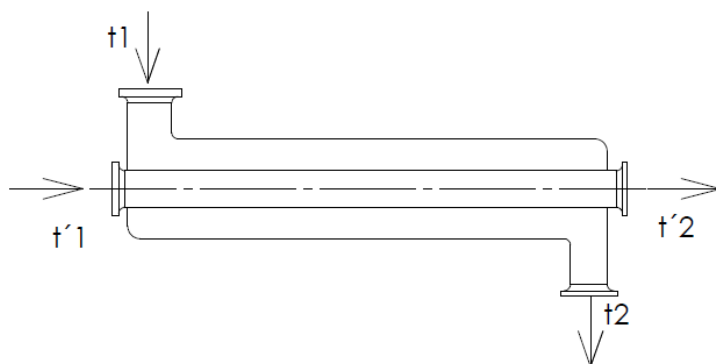
Tepelné výměníky jsou technologická zařízení, která se využívají pro přenosy tepla mezi dvěma médii. Termická účinnost tohoto procesu není 100% kvůli teplotním

rozdílům mezi vstupním ohřívacím médiem a výstupním ohřívaným médiem. Proto je velmi důležité do systému navrhnout vhodný tepelný výměník, aby se zajistila funkčnost a účinnost celého systému. V teplárenství se využívá několik druhů výměníků, které jsou navrženy tak, aby měly, co nejefektivnější přestup tepla mezi jednotlivými médii. Nejčastěji se výměníky využívají u kotlů, chladičů, výparníků nebo směšovačů.

4.4.1 Rozdělní tepelných výměníků

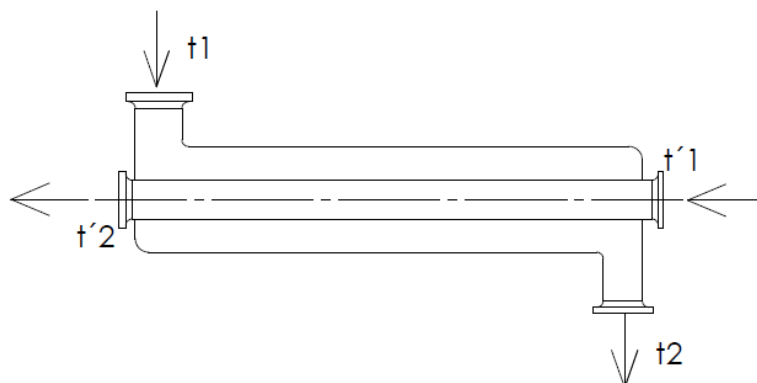
Podle směru toku médií

- a) souproud – Vektory rychlostí proudících médií mají shodný směr a jejich proudění je paralelní (viz. obr. 4.4a – souproudý výměník). [12,13]



Obr. 4.4a – Souproudý výměník

- b) protiproud - Vektory rychlostí proudících médií mají rozdílný směr a jejich proudění je paralelní (viz. obr. 4.4b – protiproudý výměník). [12,13]



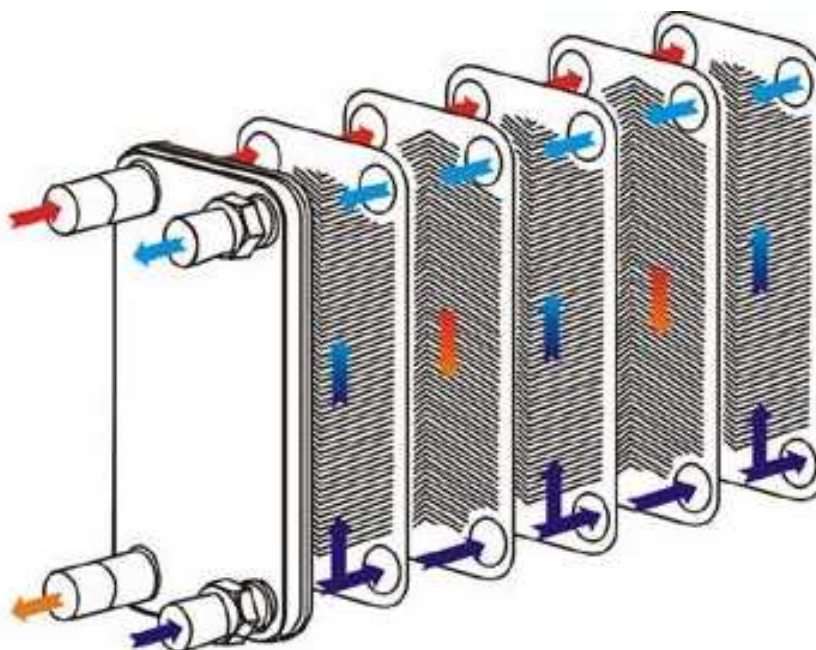
Obr. 4.4b – Protiproudý výměník

Podle konstrukce

a) Rekuperační – Výměníky tohoto typu oddělují ohřívací a ohřívané médium pomocí pevné neprostupné stěny o určité tloušťce. Velikost stěn na každé straně může být rozdílné velikosti $S_1 \neq S_2$. V praxi je tento princip bohatě využíván, jelikož můžeme mít média o různých tlacích a různých složení. Rekuperační výměníky se dále dělí na trubkové a deskové. [12,13]

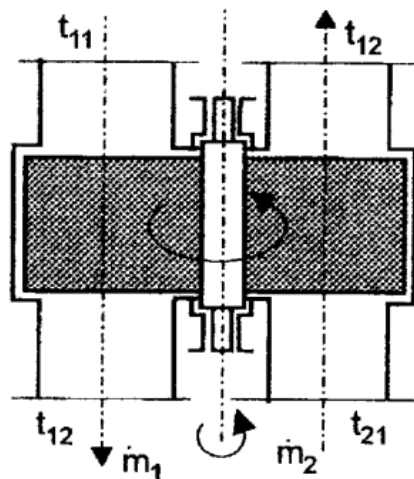
- Trubkové - Jedná se o výměníky, které jsou tvořeny trubkami a pláštěm, přičemž průtokový průměr v plášti je 2 – 3 x větší než v trubkách. Do mezitrubkového prostoru jsou umístěny přepážky, které zaručují turbulentní proudění média, a tím zintenzivňují přestup tepla a zabraňují chvění trubek. [12,13]

- Deskové – Teplosměnné plochy deskových výměníků jsou tvořené kovovými deskami o tloušťce 0,4 – 1 mm z různých materiálů (uhlíková ocel, nikl, titan). Jednotlivé desky jsou k sobě pájeny nebo jsou staženy šroubovými svorníky. V deskách jsou vytvořeny kanálky, kterými proudí média (Obr.4.4c). Každé médium má svůj kanálek, kterým proudí médium v protisměru média v sousedním kanálku. Těsnění mezi jednotlivými deskami je zajištěno pomocí speciálních pryží, silikonu, nitrilu nebo z azbestových vláken. Největší výhodou deskových výměníků oproti trubkovým je jejich velikost, jelikož při menších rozměrech mají srovnatelný výkon. [12,13]



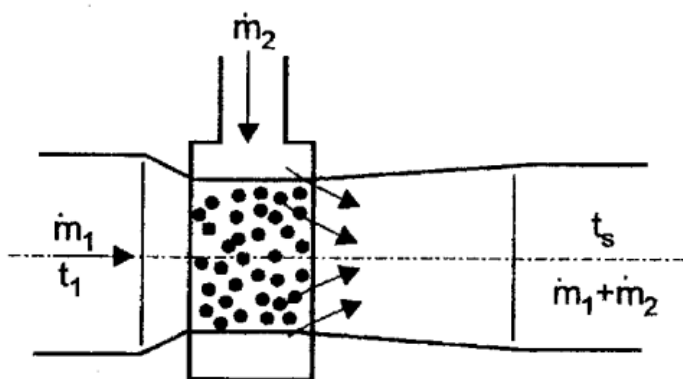
Obr. 4.4c – Funkční schéma deskového výměníku

- b) Regenerační – Teplo se přenáší pomocí výplně, která může být pohyblivá nebo nepohyblivá. Z teplejší látky se přenáší teplo do výplně, které nakumulované teplo přeneše na ohřívanou látku. Na obr.4.4d je zobrazen proces přenosu tepla u rotačních regeneračních výměníků. [12,13]



Obr. 4.4d – Regenerační výměník

- c) Směšovací – Teplosměnná plocha ve směšovacích výměnících je těžce definovatelná, jelikož přenos tepla se uskutečňuje přímým stykem pracovních látek, jak je naznačeno na obr 4.4e. Jako jednu z variant teplosměnné plochy by se dala brát povrch kapičky vody. Příklad směšovacího výměníku je chladicí věž. [12,13]



Obr. 4.4e – Směšovací výměník

5 Kontrola navrženého výměníku

(5.1)

Navržené parametry výměníku:	Délka trubek	$L = 4 \text{ m}$
	Počet trubek	$x = 144$
	Počet trubek v řadě	$x_1 = 12$
	Vnitřní průměr trubek	$d_1 = 36,5 \text{ mm}$
	Vnější průměr trubek	$d_2 = 44,5 \text{ mm}$
Parametry spalin/vzduchu:	Vstupní teplota spalin	$t_{sp,1} = 1\,000^\circ\text{C}$
	Výstupní teplota spalin	$t_{sp,2} = 220^\circ\text{C}$
	Vstupní teplota vzduchu	$t_{vz,1} = 20^\circ\text{C}$

5.1 Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu

Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu

(5.2)

$$V_{vz,s \text{ min}} = 1,012 \cdot \frac{Q_c}{4186,7} + 0,5 \left[m_N^3 / kg \right]$$

Kde: Q_c – Výhřevnost paliva [kJ/kg] (5.2)

$$V_{vz,s \text{ min}} = 1,012 \cdot \frac{21680}{4186,7} + 0,5 = 5,74 m_N^3 / kg$$

Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

Volíme součinitel přebytku vzduchu pro odpad $n = 1,3$ (5.4)

(5.5)

$$\kappa_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} [-]$$

Kde: φ – Relativní vlhkost vzduchu [%] (5.1)

p'' – Parciální tlak [MPa] (5.1)

p_c – Atmosferický tlak [MPa] (5.1)

$$\kappa_v = 1 + \frac{20}{100} \cdot \frac{0,1}{0,101325 - \frac{20}{100} \cdot 0,1} = 1,25$$

(5.6)

$$V_{vz,s}^v = n \cdot \kappa_v \cdot V_{vz,s \text{ min}} \left[m_N^3 / kg \right]$$

Kde n – Přebytek vzduchu [-] (5.4)

κ_v – Součinitel poměrného zvětšení objemu [-] (5.5)

$V_{vz,s,min}$ – Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu [m_N^3/kg] (5.2)

$$V_{vz,s}^v = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 5,74 = 9,33 m_N^3 / kg$$

5.1.1 Výpočet výhřevnosti paliva

	Množství [%]	Qi [MJ/kg]
Dřevo	45	14,62
Papír	15	14,11
PVC	10	20,5
Pryž	12	34,92
Polyethylen	5	43
Polypropylen	5	44
Polyamid	8	30

Tab. 5-1: Složení RAO

(5.7)

$$Q_c = \sum_{i=1}^7 Q_i \cdot m [MJ / kg]$$

Kde: Q_i – Výhřevnost paliva [MJ/kg] (tab. 5.1 – složení RAO)
 m – Procentuální zastoupení složek odpadu [-] (tab. 5.1 – složení RAO)

$$Q_c = 0,45 \cdot 14,62 + 0,15 \cdot 14,11 + 0,1 \cdot 20,5 + 0,12 \cdot 34,92 + 0,05 \cdot 43 + 0,05 \cdot 44 + 0,08 \cdot 30$$

$$Q_c = 21,68 MJ / kg$$

5.1.2 Výpočet množství spalín

Teoretické určení množství suchých spalín

(5.8)

$$V_{sp,t}^s = 0,95 \cdot \frac{Q_c}{4186,7} + 1,375$$

Kde: Q_c - Výhřevnost paliva [kJ/kg] (5.7)

$$V_{sp,t}^s = 0,95 \cdot \frac{21680}{4186,7} + 1,375 = 6,29 m_N^3 / kg$$

Teoretické množství vlhkých spalín

(5.9)

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H_2 + \frac{22,4}{18} \cdot w + (\kappa_v - 1) \cdot V_{vz,s} \min [m_N^3 / kg]$$

Kde: κ_v - Součinitel poměrného zvětšení objemu [-] (5.5)

H_2 – Obsah vodíku ve spalínách [%]
 w – Obsah vody ve spalínách [%]

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0785 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,0547 + (1,25 - 1) \cdot 5,74 = 2,38 m_N^3 / kg \quad (5.10)$$

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O} \left[m_N^3 / kg \right]$$

Kde: V_{H_2O} - Teoretické množství vody ve spalínách [m_N^3/kg] (5.9)

$V_{sp,t}^s$ - Teoretické množství suchých spalín [m_N^3/kg] (5.8)

$$V_{sp,t}^v = 6,29 + 2,38 = 8,67 m_N^3 / kg$$

Skutečné množství vlhkých spalín

(5.11)

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,t}^v + (n - 1) \cdot V_{vz,s}^v \left[m_N^3 / kg \right]$$

Kde: n – Přebytek vzduchu [-] (5.4)

$V_{sp,t}^v$ - Teoretické množství vlhkých spalín [m_N^3/kg] (5.10)

$V_{vz,s}^v$ - Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu [m_N^3/kg] (5.6)

$$V_{sp,s}^v = 8,67 + (1,3 - 1) \cdot 9,33 = 11,47 m_N^3 / kg$$

5.2 Spalování přídavného plynného paliva

Při spalování některých druhů radioaktivních odpadů, je nutné přidávat přídavný plyn, který podpoří proces hoření. V našem případě budeme přidávat propanbutanový plyn.

Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu

$$\text{Výhřevnost přídavného paliva } Q_p = 106 \text{ MJ/m}^3 \quad (5.12)$$

(5.13)

$$V_{vz,t,pl}^s = 0,92 \cdot \frac{Q_p}{4186,7} \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: Q_p = Výhřevnost paliva [kJ/m^3] (5.12)

$$V_{vz,t,pl}^s = 0,92 \cdot \frac{10600}{4186,7} = 23,29 m_N^3 / m_N^3$$

Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

Volíme součinitel přebytku vzduchu pro plyn $n_p = 1,1$ (5.14)

(5.15)

$$V_{vz,s,pl}^v = n_p \cdot \kappa_v \cdot V_{vz,t,pl}^s \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: n_p - Přebytek vzduchu pro plyn [-] (5.14)

$V_{vz,t,pl}^s$ - Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu [m_N^3 / m_N^3] (5.13)

κ_v - Součinitel poměrného zvětšení objemu [-] (5.5)

$$V_{vz,s,pl}^v = 1,1 \cdot 1,25 \cdot 23,29 = 32,03 m_N^3 / m_N^3$$

5.2.1 Výpočet množství spalin z plynu

Teoretické množství suchých spalin plynu

(5.16)

$$V_{sp,t,pl}^s = 1,09 \cdot \frac{Q_p}{4186,7} + 0,47 \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: Q_p = Výhřevnost přídavného paliva [kJ/m³] (5.12)

$$V_{sp,t,pl}^s = 1,09 \cdot \frac{106000}{4186,7} + 0,47 = 28,06 m_N^3 / m_N^3$$

Teoretické množství vlhkých spalin plynu

(5.17)

$$V_{H_2O} = \omega_{H_2O} + (\kappa_v - 1) \cdot V_{vz,t,pl}^s \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: κ_v - Součinitel poměrného zvětšení objemu [-] (5.5)

$V_{sp,t,pl}^s$ - Teoretické množství suchých spalin plynu [m_N^3 / m_N^3] (5.16)

$$V_{H_2O} = 15,1 + (1,25 - 1) \cdot 23,29 = 20,92 m_N^3 / m_N^3$$

(5.18)

$$V_{sp,t,pl}^v = V_{sp,t,pl}^s + V_{H_2O} \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: V_{H_2O} - Teoretické množství vody ve spalinách plynu [m_N^3 / kg] (5.17)

$V_{sp,t,pl}^s$ - Teoretické množství suchých spalin plynu [m_N^3 / m_N^3] (5.16)

$$V_{sp,t,pl}^v = 28,06 + 20,92 = 48,98 m_N^3 / m_N^3$$

Skutečné množství vlhkých spalin plynu

(5.19)

$$V_{sp,s,pl}^v = V_{sp,t,pl}^s + (n_p - 1) \cdot V_{vz,s,pl}^v \left[m_N^3 / m_N^3 \right]$$

Kde: n_p - Přebytek vzduchu pro plyn [-] (5.14)

$V_{sp,t,pl}^s$ - Teoretické množství suchých spalin plynu [m_N^3/m_N^3] (5.16)

$V_{vz,s,pl}^v$ - Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu [m_N^3/m_N^3] (5.15)

$$V_{sp,s,pl}^v = 48,98 + (1,1 - 1) \cdot 32,03 = 52,18 m_N^3 / m_N^3$$

Určení celkového normálního průtoku spalin

$$m_0 = 9 \text{ kg}$$

$$\tau = 3 \text{ min} = 180 \text{ s}$$

$$V_p = 0 - 0,008 \text{ m}^3/\text{s}$$

(5.21)

$$V_{sp,c,n} = V_{sp,s}^v \cdot \frac{m_0}{\tau} + V_{sp,s,pl}^v \cdot \dot{V}_p \left[m_N^3 / s \right]$$

Kde: m_0 – Hmotnost dávky odpadu [kg] (5.20)

τ – Časový interval [s] (5.20)

V_p – Průtok přídavného plynu [m^3/s] (5.20)

$V_{sp,s,pl}^v$ - Skutečné množství vlhkých spalin plynu [m_N^3/m_N^3] (5.19)

$V_{sp,s}^v$ - Skutečné množství vlhkých spalin [m_N^3/kg] (5.11)

$$V_{sp,c,n} = 11,47 \cdot \frac{9}{180} + 52,18 \cdot 0,008 = 0,6 m_N^3 / s$$

5.3 Fyzikální parametry výměníku

Teplo sdílené ve výměníku

(5.22)

$$i = 1,370816786 \cdot t_{sp} + 0,000158951 \cdot t_{sp}^2 \left[kJ / kg \right]$$

Kde: t_{sp} – Teplota spalin [$^{\circ}\text{C}$] (5.1)

Pro teplotu spalin na vstupu (5.22)

$$i_{1000} = 1,370816786 \cdot 1000 + 0,000158951 \cdot 1000^2 = 1529,8 kJ / kg$$

Pro teplotu spalin na výstupu (5.22)

$$i_{220} = 1,370816786 \cdot 220 + 0,000158951 \cdot 220^2 = 309,3 kJ / kg$$

Tepelný výkon

(5.23)

$$Q = V_{sp,c,n} \cdot \Delta i [kW]$$

Kde: Δi – Rozdíl sdíleného tepla ve výměníku [kJ/kg] (5.22)

$V_{sp,c,n}$ – Normální průtok spalin [m_N^3/s] (5.21)

$$Q = 0,6 \cdot (1529,8 - 309,3) = 732,3 kW$$

Objemový průtok vzduchu

$$c_{vz} = 956,7 J / (kg \cdot K) \quad (5.24)$$

(5.25)

$$V_{vz,n} = \frac{Q}{c_{vz} \cdot T_{vz,1}} [m^3 / s]$$

Kde: $T_{vz,1}$ – Termodynamická teplota vzduchu na vstupu [K] (5.1)

c_{vz} – Měrná tepelná kapacita vzduchu [J/(kg.K)] (5.24)

Q – Tepelný výkon [kW] (5.23)

$$V_{vz,n} = \frac{732300}{956,7 \cdot (273,15 + 20)} = 2,61 m^3 / s$$

Teplota vzduchu na výstupu z výměníku

(5.26)

$$t_{vz,2} = t_{vz,1} + \frac{Q}{c_{vz} \cdot V_{vz,n}} [^{\circ}C]$$

Kde: $t_{vz,1}$ – Teplota vzduchu na vstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

c_{vz} – Měrná tepelná kapacita vzduchu [J/(kg.K)] (5.24)

Q – Tepelný výkon [kW] (5.23)

$$t_{vz,2} = 20 + \frac{732300}{956,7 \cdot 2,61} = 313,3^{\circ}C$$

5.3.1 Parametry spalin

Skutečný objemový průtok spalin

(5.27)

$$V_{sp,1} = V_{sp,c,n} \cdot \frac{t_{sp} + 273,15}{273,15} [m^3 / s]$$

Kde: t_{sp} – Teplota spalin na vstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

$V_{sp,c,n}$ - Normální průtok spalin [m_N^3/s] (5.21)

Skutečný objemový průtok spalin na vstupu do výměníku (5.27)

$$V_{sp,1} = 0,6 \cdot \frac{1000 + 273,15}{273,15} = 2,79 m^3 / s$$

Skutečný objemový průtok spalin na výstupu do výměníku (5.27)

$$V_{sp,2} = 0,6 \cdot \frac{220 + 273,15}{273,15} = 1,08 m^3 / s$$

Maximální rychlost proudění spalin v trubkách by neměla přesahovat 25m/s.

Výpočet měrného tepla spalin

Dvě možnosti výpočtu

(5.28)

$$a) c_{sp} = \frac{\Delta i}{\Delta t} [-]$$

Kde: Δt – Rozdíl teplot spalin na vstupu a výstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

Δi – Rozdíl sdíleného tepla ve výměníku [kJ/kg] (5.22)

$$c_{sp} = \frac{1529,8 - 309,3}{1000 - 220} = 1,6$$

(5.29)

$$b) c_{sp} = 2,147 \cdot 10^{-4} \cdot t_{sp,1} + 1,46 [-]$$

Kde: $t_{sp,1}$ – Teplota spalin na vstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

$$c_{sp} = 2,147 \cdot 10^{-4} \cdot (1000 + 273,15) + 1,46 = 1,7$$

Rychlost spalin

(5.30)

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot V_{sp}}{x \cdot \pi \cdot d_1^2} [m / s]$$

Kde: V_{sp} – Skutečný objemový průtok spalin [m^3/s] (5.27)

d_1 – Vnitřní průměr výměníku [m] (5.1)

x – Počet trubek v řadě [-] (5.1)

Rychlost spalin na vstupu do trubek (5.30)

$$w_{sp,1} = \frac{4 \cdot 2,79}{200 \cdot \pi \cdot 0,0365^2} = 18,52 m / s$$

Rychlost spalin na výstupu z trubek (5.30)

$$w_{sp,2} = \frac{4 \cdot 1,08}{200 \cdot \pi \cdot 0,0365^2} = 7,17 \text{ m/s}$$

Reynoldsovo číslo

$$\text{Určení kinematické viskozity spalin: } t_{sp} = 1000^\circ\text{C} > v_{sp} = 2,41 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5.31)$$

$$t_{sp} = 220^\circ\text{C} > v_{sp} = 7,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5.32)$$

$$\text{Re}_{sp} = \frac{w_{sp} \cdot d_1}{\nu_{sp}} [-]$$

Kde: w_{sp} – Rychlost spalin [m/s] (5.30)
 d_1 – Vnitřní průměr výměníku [m] (5.1)
 ν_{sp} – Kinematická viskozita spalin [m²/s] (5.31)

Reynoldsovo číslo na vstupu trubek (5.32)

$$\text{Re}_{sp,1} = \frac{18,52 \cdot 0,0365}{2,41 \cdot 10^{-4}} = 2805$$

Reynoldsovo číslo na výstupu trubek (5.32)

$$\text{Re}_{sp,2} = \frac{7,17 \cdot 0,0365}{7,81 \cdot 10^{-5}} = 3351$$

5.3.2 Přestup tepla na straně spalin

Hustota spalin

$$\text{Ve spalovací komoře bude podtlak } p_{pod} = 100 \text{ Pa.} \quad (5.33)$$

$$(5.34)$$

$$\rho_{sp} = \frac{p_b - p_{pod}}{r \cdot (T_{sp})} [kg / m^3]$$

Kde: T_{sp} – Termodynamická teplota spalin [K] (5.1)
 p_b – Barometrický tlak [Pa]
 p_{pod} – Podtlak ve spalovací komoře [Pa] (5.33)
 r – Měrná plynová konstanta [J/(kg.K)]

$$\rho_{sp,1000} = \frac{101325 - 100}{287 \cdot (1000 + 273,15)} = 0,277$$

$$\rho_{sp,610} = \frac{101325 - 100}{287 \cdot (273,15 + 610)} = 0,4$$

$$\rho_{sp,388,3} = \frac{101325 - 100}{287 \cdot (273,15 + 388,3)} = 0,533$$

Teplota [°C]	Hustota [kg/m ³]
1000	0,277
610	0,4
388,3	0,533

Tab. 5.3a – Závislosti hustot spalín na teplotě

Tepelná vodivost spalín

[1] (5.35)

Pro 220 °C > $\lambda_{220} = 0,0876 \text{ W/(m.K)}$

Pro 1000 °C > $\lambda_{1000} = 0,05314 \text{ W/(m.K)}$

Prandtlovo číslo

[1](5.36)

Pro 220 °C > $Pr_{220} = 0,726$

Pro 1000 °C > $Pr_{1000} = 0,763$

Kinematická viskozita

[1] (5.37)

Pro 220 °C > $\nu_{220} = 7,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Pro 388,3 °C > $\nu_{388,3} = 6,15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Pro 610 °C > $\nu_{610} = 9,847 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Pro 1000 °C > $\nu_{1000} = 2,41 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Dynamická viskozita

(5.38)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \rightarrow \mu = \nu \cdot \rho$$

Kde: ν – Kinematická viskozita [m^2/s] (5.37)

ρ – Hustota spalín [kg/m^3] (Tab. 5.3a)

Pro teplotu média (5.38)

$$t_{med} = \frac{1000 + 220}{2} = 610^\circ\text{C} \rightarrow \mu_{med} = 3,9388 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} \quad [14]$$

Pro teplotu stěny (5.38)

$$t_{st} = \frac{\frac{313,3 + 20}{2} + 610}{2} = 388,3^\circ\text{C} \rightarrow \mu_{st} = 3,277 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} \quad [14]$$

Nusseltovo kritérium

(5.39)

$$Nu = 0,116 \cdot \left(1 + \frac{d_1}{L}\right)^{0,667} \cdot (\text{Re}_{sp}^{0,667} - 125) \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_{med}}{\mu_{st}}\right)^{0,14} \quad [-]$$

Kde: Re_{sp} – Reynoldsovo číslo [-] (5.32)

d_1 – Vnitřní průměr výměníku [m] (5.1)

L – Délka výměníku [m] (5.1)

Pr – Prandtlovo číslo [-] (5.36)

μ_{med} – Dynamická viskozita pro teplotu média [Pa.s] (5.38)

μ_{st} – Dynamická viskozita pro teplotu stěny [Pa.s] (5.38)

Nusseltovo kritérium na vstupu spalín z trubek (5.39)

$$Nu_1 = 0,116 \cdot \left(1 + \frac{0,0365}{4}\right)^{0,667} \cdot (2805^{0,667} - 125) \cdot 0,763^{0,33} \cdot \left(\frac{3,9388 \cdot 10^{-5}}{3,277 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,14}$$

$$Nu_1 = 8,15$$

Nusseltovo kritérium na výstupu spalín z trubek (5.39)

$$Nu_2 = 0,116 \cdot \left(1 + \frac{0,0365}{4}\right)^{0,667} \cdot (3351^{0,667} - 125) \cdot 0,726^{0,33} \cdot \left(\frac{3,9388 \cdot 10^{-5}}{3,277 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,14}$$

$$Nu_2 = 10,72$$

Součinitel přestupu tepla

(5.40)

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} \left[\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \right]$$

Kde: Nu – Nusseltovo číslo [-] (5.39)

d_1 – Vnitřní průměr výměníku [m] (5.1)

λ – Tepelná vodivost [W/(m.K)] (5.35)

Součinitel přestupu tepla na vstupu spalín do trubek (5.40)

$$\alpha_1 = \frac{8,15 \cdot 0,05314}{0,0365} = 11,87 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Součinitel přestupu tepla na výstupu spalin z trubek (5.40)

$$\alpha_2 = \frac{10,72 \cdot 0,0876}{0,0365} = 28,49 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Složení spalin

$$\text{CO}_2 = 11,32\% \quad [1]$$

$$\text{H}_2\text{O} = 9,63\% \quad [1]$$

$$p_{\text{CO}_2} = 101325 \cdot 0,1132 = 1,15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 101325 \cdot 0,0963 = 0,98 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

(5.41)

t [°C]	ϵ_{CO_2}	$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$
1000	0,046	0,0185
610	0,052	0,034
220	0,049	0,051
$\epsilon_{\text{stř}}$	0,052	0,034

Tab. 5.3b: Poměrná pohltivost CO₂ a H₂O při určitých teplotách

(5.42)

$$C_{\text{CO}_2} = 1$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 1,2$$

$$\epsilon_{sp} = C_{\text{CO}_2} \cdot \epsilon_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} [-]$$

Kde: ϵ_{CO_2} – Střední poměrná pohltivost CO₂ [-] (Tab. 5.3b) $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ - Střední poměrná pohltivost H₂O [-] (Tab. 5.3b)

$$\epsilon_{sp} = 1 \cdot 0,052 + 1,2 \cdot 0,034 = 0,0928$$

Součinitel přestupu tepla sálánímPro teplotu $t_{\text{st}} = 388,3^\circ\text{C}$ a $t_{\text{m}} = 610^\circ\text{C}$ volíme součinitel $\beta = 85$.

(5.43)

$$\alpha = \beta \cdot \epsilon_{sp} \left[\text{W / (m}^2 \cdot \text{K)} \right]$$

Kde: ϵ_{sp} – Střední poměrná pohltivost spalin [-] (5.42)

$$\alpha = 85 \cdot 0,0928 = 7,88 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na horké straně

(5.44)

$$\alpha_{cel} = \alpha + \alpha_1 \left[W / (m^2 \cdot K) \right]$$

Kde: α – Součinitel přestupu tepla sáláním $[W/(m^2 \cdot K)]$ (5.43)

α_1 – Součinitel přestupu tepla na vstupu spalín do trubek $[W/(m^2 \cdot K)]$ (5.40)

$$\alpha_{cel} = 11,87 + 7,88 = 19,75 W / (m^2 \cdot K)$$

5.3.3 Parametry vzduchu

Objemový průtok při normálním tlaku

(5.45)

$$V_{vz} = V_{vz,n} \cdot \frac{T_{vz}}{273,15} \left[m^3 / s \right]$$

Kde: T_{vz} – Termodynamická teplota vzduchu $[K]$ (5.1)

$V_{vz,n}$ – Objemový průtok vzduchu $[m^3/s]$ (5.25)

Objemový průtok na vstupu při normálním tlaku (5.45)

$$V_{vz,1} = 2,61 \cdot \frac{20 + 273,15}{273,15} = 2,8 m^3 / s$$

Objemový průtok na výstupu při normálním tlaku (5.45)

$$V_{vz,2} = 2,61 \cdot \frac{313,3 + 273,15}{273,15} = 5,6 m^3 / s$$

Rychlost vzduchu v nejužších místech výměníku

(5.46)

$$w_{vz} = \frac{V_{vz}}{x_1 \cdot (S_k - d_2) \cdot L} \left[m / s \right]$$

Kde: x_1 – Počet trubek v řadě $[-]$ (5.1)

d_2 – Vnější průměr trubek $[m]$ (5.1)

V_{vz} – Objemový průtok vzduchu při normálním tlaku $[m^3/s]$ (5.45)

L – Délka výměníku $[m]$ (5.1)

S_k – Rozteč trubek v řadě $[m]$ (5.1)

Rychlost vzduchu v nejužších místech na vstupu výměníku (5.46)

$$w_{vz,1} = \frac{2,8}{12 \cdot (0,0545 - 0,0445) \cdot 4} = 5,83 m / s$$

Rychlost vzduchu v nejužších místech na výstupu výměníku (5.46)

$$w_{vz,2} = \frac{5,6}{12 \cdot (0,0545 - 0,0445) \cdot 4} = 11,66 \text{ m/s}$$

5.3.4 Fyzikální charakteristika vzduchu

Teplotní vodivost

(5.47)

$$a_1 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Kde: c – Měrná tepelná kapacity vzduchu [J/(Kg.K)] (Tab. 5.3c)

λ – Tepelná vodivost [W/(m.K)] (Tab. 5.3c)

ρ – Hustota vzduchu [kg/m³] (Tab. 5.3c)

Kinematická viskozita

(5.48)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Kde: ρ – Hustota vzduchu [kg/m³] (Tab. 5.3c)

μ – Dynamická viskozita [Pa.s] (Tab. 5.3c)

Prandtlovo číslo

(5.49)

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

Kde: ν – Počet trubek v řadě [-] (Tab. 5.3c)

a – Součinitel teplotní vodivosti [m²/s] (Tab. 5.3c)

	$t_{vz,1} = 20 \text{ °C}$	$t_{vz,2} = 313,3 \text{ °C}$
Dynamická viskozita [14]	$18,179 \cdot 10^{-6}$	$29,881 \cdot 10^{-6}$
Tepelná vodivost [14]	0,0257	0,0458
Hustota vzduchu	1,293	
Měrná tep. kap. vzduchu	992,8	1055,02
Teplotní vodivost	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$
Kinematická viskozita	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$
Prandtlovo číslo	0,7	0,689

Tab. 5.3c – Charakteristika vzduchu při určitých teplotách

Ekvivalentní průměr

(5.50)

$$d_{ekv} = \frac{4 \cdot S}{O} = \frac{4 \cdot [x_1 \cdot (S_k - d_2) \cdot L]}{2 \cdot [x_1 \cdot (S_k - d_2) + L]} [m]$$

Kde: x_1 – Počet trubek v řadě [-] (5.1)
 d_2 – Vnější průměr trubek [m] (5.1)
 L – Délka výměníku [m] (5.1)
 S_k – Rozteč trubek v řadě [m] (5.1)

$$d_{ekv} = \frac{4 \cdot [12 \cdot (0,0545 - 0,0445) \cdot 4]}{2 \cdot [12 \cdot (0,0545 - 0,0445) + 4]} = 0,23m$$

Reynoldsovo číslo vzduchu

(5.51)

$$Re_{vz} = \frac{w_{vz} \cdot d_{ekv}}{\nu_{vz}}$$

Kde: w_{vz} – Rychlost vzduchu [m/s] (5.46)
 d_{ekv} – Ekvivalentní průměr [m] (5.50)
 ν_{vz} – Kinematická viskozita vzduchu [m²/s] (Tab. 5.3c - 5.48)

Reynoldsovo číslo na vstupu vzduchu do výměníku (5.51)

$$Re_{vz,1} = \frac{5,83 \cdot 0,23}{1,4 \cdot 10^{-5}} = 97087$$

Reynoldsovo číslo na výstupu vzduchu z výměníku (5.51)

$$Re_{vz,2} = \frac{11,66 \cdot 0,23}{2,31 \cdot 10^{-5}} = 117681$$

5.3.5 Přestup tepla na straně vzduchu

Teplota média

(5.52)

$$t_{med} = \frac{t_{vz,1} + t_{vz,2}}{2} = \frac{20 + 313,3}{2} = 166,65^\circ C$$

Kde: $t_{vz,1}$ – Teplota vzduchu na vstupu [°C] (5.1)
 $t_{vz,2}$ – Teplota vzduchu na výstupu [°C] (5.26)

	t_{st} = 388,3 °C	t_{med} = 166,65 °C
Dynamická viskozita [14]	32,37.10 ⁻⁶	24,447.10 ⁻⁶
Tepelná vodivost [14]	0,0501	0,0364
Hustota vzduchu	1,293	
Měrná tep. kap. vzduchu	1071,84	1022,87
Teplotní vodivost	3,61.10 ⁻⁵	2,75.10 ⁻⁵
Kinematická viskozita	2,5.10 ⁻⁵	1,89.10 ⁻⁵
Prandtlovo číslo	0,692	0,687

Tab 5.3d – Charakteristika vzduchu při určitých teplotách

Nusseltovo kritérium pro vzduch

(5.53)

$$Nu_{vz} = 0,021 \cdot Re_{vz}^{0,8} \cdot Pr_{st}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{med}}{Pr_{st}} \right)^{0,25} [-]$$

Kde: Re_{vz} – Reynoldsovo číslo [-] (5.51)

Pr_{st} – Prandtlovo číslo pro teplotu stěny [-] (Tab 5.3d)

Pr_{med} – Prandtlovo číslo pro teplotu média [-] (Tab 5.3d)

Nusseltovo kritérium pro vzduch vstupující do výměníku (5.53)

$$Nu_{vz,1} = 0,021 \cdot 97087^{0,8} \cdot 0,692^{0,43} \cdot \left(\frac{0,687}{0,692} \right)^{0,25} = 174,74$$

Nusseltovo kritérium pro vzduch vystupující z výměníku (5.53)

$$Nu_{vz,2} = 0,021 \cdot 117681^{0,8} \cdot 0,687^{0,43} \cdot \left(\frac{0,687}{0,692} \right)^{0,25} = 203,18$$

Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu

(5.54)

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{ekv}} [W/(m.K)]$$

Kde: Nu – Nusseltovo [-] (5.51)

d_{ekv} – Ekvivalentní průměr [m] (5.50)

λ – Tepelná vodivost [W/(m.K)] (Tab 5.3c)

Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu pro vstup do výměníku (5.54)

$$\alpha_{vz,1} = \frac{174,74 \cdot 0,0257}{0,23} = 19,27 W/(m.K)$$

Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu pro výstup z výměníku (5.54)

$$\alpha_{vz,2} = \frac{203,18 \cdot 0,0458}{0,23} = 39,93 \text{ W / (m.K)}$$

5.4 Prostup tepla

Součinitel prostupu tepla výměníku

(5.55)

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_{cel} \cdot R_1} + \frac{1}{\lambda_o} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\alpha_{vz} \cdot R_2}}$$

Kde: R_1 – Vnitřní poloměr trubek [m] (5.1)

R_2 – Vnější poloměr trubek [m] (5.1)

α_{cel} – Součinitel přestupu tepla na straně spalin [W/(m.K)] (5.1)

α_{vz} – Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu [W/(m.K)] (5.1)

λ_o – Tepelná vodivost oceli [W/(m.K)] (5.1)

Součinitel prostupu tepla pro vstup do výměníku (5.55)

$$k_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{19,75 \cdot 0,01825} + \frac{1}{47} \cdot \ln \frac{0,02225}{0,01825} + \frac{1}{19,27 \cdot 0,02225}} = 1,22 \text{ W / (m.K)}$$

Součinitel prostupu tepla pro výstup z výměníku (5.55)

$$k_2 = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{28,49 \cdot 0,01825} + \frac{1}{47} \cdot \ln \frac{0,02225}{0,01825} + \frac{1}{39,93 \cdot 0,02225}} = 2,05 \text{ W / (m.K)}$$

Střední hodnota součinitele prostupu tepla

(5.56)

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

Kde: k_1 – Součinitel prostupu tepla pro vstup [W/(m.K)] (5.55)

k_2 – Součinitel prostupu tepla pro výstup [W/(m.K)] (5.55)

$$k = \frac{1,22 + 2,05}{2} = 1,635 \text{ W / (m.K)}$$

Střední logaritmický spád

(5.57)

$$\Delta t_s = \frac{(t_{sp,1} - t_{vz,2}) - (t_{sp,2} - t_{vz,1})}{\ln \frac{t_{sp,1} - t_{vz,2}}{t_{sp,2} - t_{vz,1}}} [^{\circ}C]$$

Kde: $t_{sp,1}$ – Teplota spalin na vstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

$t_{sp,2}$ – Teplota spalin na výstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

$t_{vz,1}$ – Teplota vzduchu na vstupu [$^{\circ}C$] (5.1)

$t_{vz,2}$ – Teplota vzduchu na výstupu [$^{\circ}C$] (5.26)

$$\Delta t_s = \frac{(1000 - 313,3) - (220 - 20)}{\ln \frac{1000 - 313,3}{220 - 20}} = 394,5^{\circ}C$$

Kontrola délky trubky

(5.58)

$$Q = k \cdot L \cdot x_{tr} \cdot \Delta t_s \rightarrow L = \frac{Q}{k \cdot x_{tr} \cdot \Delta t_s} [m]$$

Kde: x_{tr} – Počet trubek [-] (5.1)

Q – Tepelný výkon [W] (5.23)

k – Střední hodnota součinitele prostupu tepla [W/(m.K)] (5.56)

Δt_s – Střední logaritmický spád [$^{\circ}C$] (5.57)

$$L = \frac{732300}{1,635 \cdot 288 \cdot 394,5} = 3,92m$$

5.5 Aerodynamický výpočet ztrát

5.5.1 Ztráta tření pro I. a II. tah

Střední teplota pro I. tah

(5.59)

$$t_{stř, I \text{ tah}} = \frac{1000 + 610}{2} = 805^{\circ}C$$

(5.60)

$$\rho_{sp, 805^{\circ}C} = 0,327 \text{ kg/m}^3 \quad [14]$$

Střední teplota pro II. tah

(5.61)

$$t_{stř, II \text{ tah}} = \frac{610 + 220}{2} = 415^{\circ}C$$

$$\rho_{sp,415^{\circ}C} = 0,512 \text{ kg/m}^3 \quad [14] \quad (5.62)$$

Blasiuv vztah pro částečnou turbulenci a hladké potrubí

$$\lambda_{tř,I} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re_{sp}}} [-] \quad (5.63)$$

Kde: Re_{sp} – Reynoldsovo číslo [-] (5.32)

Pro I. tah (5.63)

$$\lambda_{tř,I} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{2805}} = 0,04$$

Pro II. tah (5.63)

$$\lambda_{tř,II} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{3351}} = 0,04$$

Třecí ztráta

$$p_{tř} = \lambda_{tř} \cdot \frac{L}{d_1} \cdot \frac{w_{sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} \cdot \left(1 + \frac{T_{stř}}{273,15} \right) [Pa] \quad (5.64)$$

Kde: $T_{stř}$ – Reynoldsovo číslo [K] (5.59, 5.61)

ρ_{sp} – Hustota spalin [kg/m³] (5.60, 5.62)

$\lambda_{tř}$ – Třecí koeficient [-] (5.63)

d_1 – Vnitřní průměr výměníku [m] (5.1)

L – Délka trubek výměníku [m] (5.1)

Pro I. tah (5.64)

$$p_{tř,I} = 0,04 \cdot \frac{4}{0,0365} \cdot \frac{18,52^2}{2} \cdot 0,327 \cdot \left(1 + \frac{805 + 273,15}{273,15} \right) = 1216,1 Pa$$

Pro II. tah (5.64)

$$p_{tř,II} = 0,04 \cdot \frac{4}{0,0365} \cdot \frac{7,17^2}{2} \cdot 0,512 \cdot \left(1 + \frac{273,15 + 415}{273,15} \right) = 203 Pa$$

Místní ztráty pro I. a II. tah

$$\xi = (4 + 6,6 \cdot x_1) \cdot Re_{vz}^{-0,28} [-] \quad (5.65)$$

Kde: x_1 – Počet trubek v řadě [-] (5.1)
 Re_{vz} – Reynoldsovo číslo [-] (5.51)

(5.66)

$$p_m = \xi \cdot \frac{w_{sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} [Pa]$$

Kde: ρ_{sp} – Hustota spalin [kg/m³] (5.60, 5.62)
 w_{sp} – Rychlost spalin [m/s] (5.30)
 ξ – Koeficient místních ztrát [-] (5.65)

Pro I. tah (5.65, 5.66)

$$\xi_I = (4 + 6,6 \cdot 12) \cdot 97087^{-0,28} = 3,3$$

$$p_{m,I} = 3,3 \cdot \frac{18,52^2}{2} \cdot 0,327 = 185 Pa$$

Pro II. tah (5.65, 5.66)

$$\xi_{II} = (4 + 6,6 \cdot 12) \cdot 117681^{-0,28} = 3,16$$

$$p_{m,II} = 3,16 \cdot \frac{7,17^2}{2} \cdot 0,512 = 41,58 Pa$$

Celková tlaková ztráta na straně spalin

$$p_{z,cel} = \sum p_{tr} + \sum p_m = 1216,1 + 203 + 185 + 41,58 = 1645,68 Pa$$

6 Závěr

Cílem této práce bylo popsat spalování radioaktivních odpadů, vytvoření návrhu tepelného výměníku dle předem stanovených technických parametrů a v návaznosti na to spočítat kombinované přestupy tepla ze spalin do vzduchu a to včetně aerodynamických ztrát.

V úvodu práce byla provedena klasifikace radioaktivních odpadů dle různých kritérií, z nichž pro další průběh práce mělo stěžejní význam rozdělení odpadů na spalitelné a nespalitelné. Tímto rozdělením došlo k jasnému vymezení množiny odpadů, u nichž je možno při jejich likvidaci uvažovat o jejich spalování.

Toto prvotní rozdělení bylo ovšem pro další postup práce nedostačující z důvodu jeho přílišné obecnosti, kdy skupina spalitelných odpadů zahrnuje značný rozsah potenciálních materiálů, které se od sebe navzájem odlišují svými fyzikálními, chemickými aj. vlastnostmi. Pro efektivitu spalovacího procesu má v tomto ohledu stěžejní význam výhřevnost daného posuzovaného odpadu. Z tohoto důvodu bylo pro další průběh práce nutno přistoupit k homogenizaci spalovací směsi odpadu, která bude obsahovat složky papíru, pryže, PVC, polyethylenu, polypropylenu a polyamidu. Celková výhřevnost této směsi je 21,68 MJ/kg.

Dalším z cílů práce bylo navrhnout tepelný výměník tepla, který je nedílnou součástí spaloven radioaktivních odpadů, spočítat jeho prostupy tepla ze spalin do vzduchu a celkové aerodynamické ztráty. U navrhování výměníků jsem vycházel ze vstupních a výstupních parametrů spalin a základních hodnoty výměníku, mezi které patří délka a počet trubek ve výměníku. Výpočtová část vyšla s následujícími hodnotami prostup tepla ze spalin do vzduchu $k = 1,635 \text{ W/(m.K)}$ a celkové aerodynamické ztráty $P_{z, cel} = 1645,8 \text{ Pa}$. Závěrem mé práce je výkres výměníku s jeho modelem a schéma umístění výměníku ve spalovně.

7 Seznam použité literatury

- [1] PROCHÁZKOVÁ, Olga. Návrh spalovny radioaktivních odpadů. [s.1.], 2007. 42s. VŠB-TU. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
- [2] Radioaktivní odpady [online], [cit.2015-04-15]. Dostupné z: http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/odpady_3.html
- [3] Aktivita zářiče a rozpadový zákon. REICHEL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online], [cit. 2015-04-15] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/807-aktivita-zarice-a-rozpadovy-zakon>
- [4] Radioaktivní odpady z jaderných elektráren. [online], [cit.2015-04-15]. Dostupné z: http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/jaderel_3.html
- [5] Radioaktivní odpady. [online], [cit.2015-04-15]. Dostupné z: http://www.geocaching.com/geocache/GC4XC4X_radioaktivni-odpady?guid=9428de94-1e30-449a-b79f-bdb446bbddc9
- [6] BRADÁČ, Antonín. Radioaktivní odpad v nemocničních zařízeních. [s.1.], 2013. 55s. VUT-Brno. Vedoucí diplomové práce Ing. Andrea Tabasová, Ph.D.
- [7] Konečná likvidace: Vitifikace. [online], [cit.2015-04-15]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/likvidace_4.html
- [8] VOHRALÍK, Lukáš. Nové trendy v ukládání RAO. [s.1.], 2010. 60s. VUT-Brno. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Oldřich Matal, CSC.
- [9] TITLOVÁ, Elena. Konceptia technologického spracovania pevných rádioaktivných odpadov z jadroveenergetických zariadení. [s.1.] 1993. 155s. Vysoká škola chemicko – technologická v Prahe. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Věra Jedináková – Křížová, DrSc..
- [10] DALTON, David. RADIOACTIVE WASTE INCINERATION [Online], [cit. 4.5.2015]. Idaho Falls, Idaho, 1991.
- [11] BALÁŠ, M., Kotle a výměníky tepla, 1. vyd., Cerm 2009, ISBN 978-80-214-3955-9
- [12] Výměníky tepla. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Prenos_tepla_a_hmoty/v%FDm%ECn%EDky%202013.pdf
- [13] DVOŘÁK, Petr. Návrh kondenzačního výměníku za turbínou. [s.1.]. 2013. 49s. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.
- [14] E-tabulky. [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/index.php/cs/studium/uplatneni-absolventu/e-tabulky>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1. Mezinárodní značení radioaktivního odpadu	
Obrázek 2. Graf znázorňující poločas rozpadu	[3]
Obrázek 3. Objemy zpracovaných RAO na území ČR v posledních letech	
Obrázek 4. Souproudý výměník	[12]
Obrázek 5. Protiproudý výměník	[12]
Obrázek 6. Funkční schéma deskového výměníku	[12]
Obrázek 7. Regenerační výměník	[13]
Obrázek 8. Směšovací výměník	[13]

Seznam příloh

Příloha č.1 Schéma spalovny RAO
Příloha č.2 Výkres výměníku